

Ryszard Kobialka*, Zdzisław Naziemiec**

BADANIA PROCESU KRUSZENIA SZCZĘKAMI O RÓŻNYM PROFILU POPRZECZNYM***

1. Wprowadzenie

Trudności w objaśnianiu procesów rozdrabniania nie dały, jak do tej pory, podstaw do analizowania wpływu powierzchni płyt kruszących na efekty rozdrabniania. Problem ten jest niedoceniany przez konstruktorów, jak i naukowców. Większe znaczenie jest przypisywane rozwiązaniom ukształtowania komór kruszenia (profil podłużny) [5] np. w odniesieniu do granulatorów szczękowych. Dotychczasowe nieliczne eksperymenty wskazują na duże zróżnicowanie efektów rozdrabniania w zależności od ukształtowania powierzchni wykładzin szczęk (profil poprzeczny). Zagadnienie to uwzględniane jest np. w konstrukcji walców pras walcowych. Stosowane są tam różne sposoby rowkowania powierzchni, najczęściej w postaci kratownicy utworzonej z rowków trapezowych o różnej głębokości i różnym kącie nachylenia względem osi walców. Zadaniem odpowiednio ukształtowanej powierzchni jest przeniesienie nacisków w głąb prasowanego materiału a równocześnie przeciwdziałanie niekorzystnemu zjawisku jakim jest poślizg materiału względem powierzchni walców.

W kruszarkach szczękowych najczęściej stosowane są szczęki z rowkowaniem o przekroju trójkątnym. Relacja wysokości zębów h do podziałki rowkowania t wynosi zwykle $h/t = 0,5$. Nie ma ustalonych zasad doboru wymiarów rowkowania np. w odniesieniu do wielkości szczeliny wylotowej kruszarki e . W przeprowadzonych doświadczeniach korzystne wyniki uzyskiwano dla rowkowania w kształcie trapezu o podziałce $t \leq e$ i wysokości zębów $h = (0,5 \div 0,7) t$. [1, 2, 3].

Wykładziny szczęk kruszarek szczękowych są tak wykonane, że zęby jednej płyty wchodzi w zagłębienia płyty przeciwległej. Takie rowkowanie płyt jest korzystne ale ulega szybkiemu zużyciu i co pewien czas płyty muszą być wymieniane na nowe. W celu przedłużenia żywotności płyt kruszących stosuje się ich obracanie o 180° , a także (szczególnie

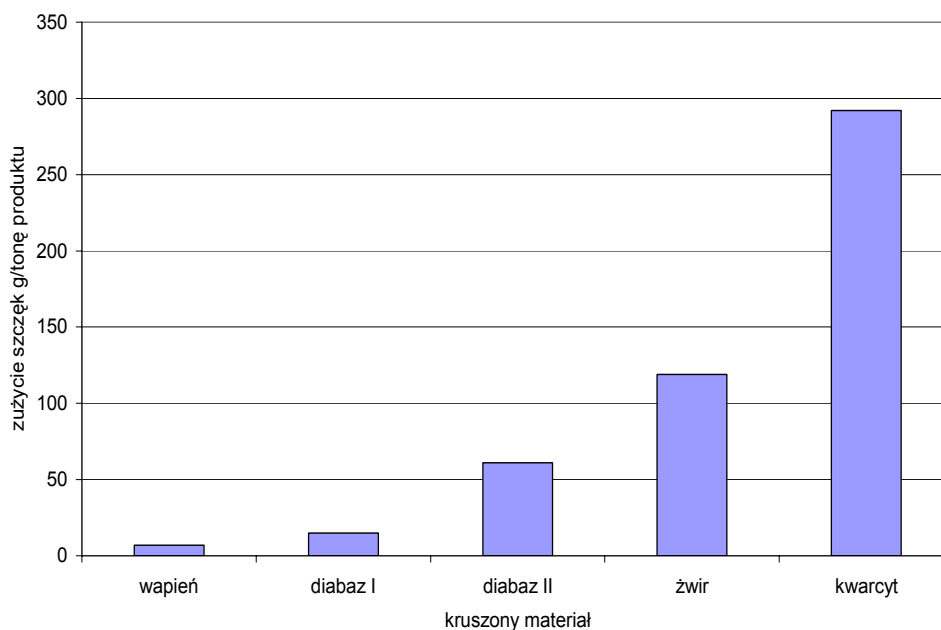
* Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych, Kraków

*** Artykuł jest wynikiem projektu badawczego KBN nr 4T12A03026

w dużych kruszarkach) stosuje się płyty dzielone, które można obracać a ponadto zamieniać miejscami w komorze kruszenia.

Orientacyjne zużycie wykładzin szczęk kruszarki szczękowej, wykonanych ze stali manganowej (12,5% Mn), przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zużycie szczęk ze stali manganowej, przy kruszeniu różnych materiałów [4]

2. Opis prac doświadczalnych

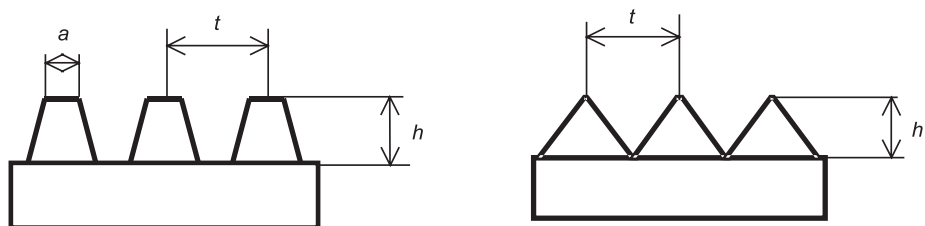
Poszukując optymalnego rowkowania wykładzin szczęk, charakteryzującego się dobrymi rezultatami rozdrabniania jak też długim czasem eksploatacji, przeprowadzono próby z nietypowym ustawieniem wykładzin szczęk w komorze kruszenia kruszarki szczękowej. Zestawiono mianowicie szczękę gładką ze szczęką o powierzchni rowkowanej (w rozwiązaniach przemysłowych współpracujące płyty posiadają identyczny kształt rowkowania).

Zastosowano ustawienie szczęk:

- szczęka nieruchoma — o gładkiej powierzchni roboczej,
- szczęka ruchoma — o powierzchni rowkowanej.

W przeprowadzonych doświadczeniach badane były wykładziny szczęk kruszarki szczękowej z rowkowaniem o przekroju kołowym, trójkątnym i trapezowym, o różnej szerokości podziałki t i wysokości zębów h . Zarys rowkowania szczęk (profil poprzeczny) i podstawo-

we wymiary rowków podano na rysunku 2 i w tabeli 1. Dla różnych wykładzin szczęk oceniono skład ziarnowy produktów, stopień rozdrobnienia, zawartość ziaren nieforemnych, a także dokonano pomiaru wydajności i wielkości sił kruszenia.



Rys. 2. Kształty i wymiary rowkowania powierzchni wykładzin szczęk

TABELA 1

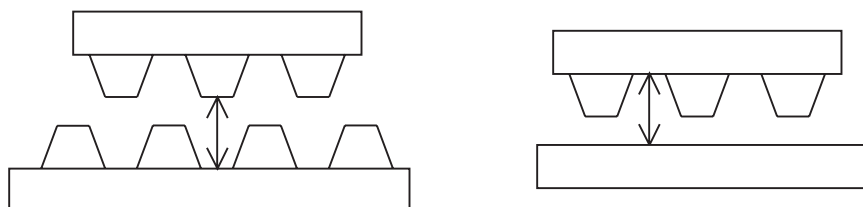
Opis i wymiary rowkowania powierzchni wykładzin szczęk użytych do badań

Lp.	Rodzaj rowkowania powierzchni wykładzin szczęk	Podziałka rowków t , mm	Wysokość zębów h , mm	h/t	Szerokość zębów a , mm
1	szczęki gładkie	–	–	–	–
2	trójkąt niski	24	12	0,5	–
3	trójkąt wysoki	24	17	0,7	–
4	trapez niski	24	12	0,5	6
5	trapez wysoki	24	17	0,7	6
6	trapez zagęszczony	17	12	0,7	4
7	kołowe	24	12	0,5	–

W celu porównania wyników, próby kruszenia prowadzono przy szczelinie $e = 20$ mm. Zasadę pomiaru szczeliny przedstawiono na rysunku 3. Należy zaznaczyć, że w przypadku zestawu szczęk: gładka + rowkowana, wielkość pola przekroju wylotu z kruszarki była relatywnie mniejsza niż dla obu szczęk rowkowanych. Do prób kruszenia użyto surowców skalnych powszechnie stosowanych do produkcji kruszyw. Były to – wapień z Czatkowic, porfir z Zalas i diabaz z Niedźwiedziej Góry.

Parametry pracy kruszarki szczękowej przedstawiały się następująco:

- obroty wału mimośrodowego 320 min^{-1} ;
- średnia prędkość liniowa szczęki ruchomej na poziomie szczeliny wylotowej $v = 0,85 \text{ m/s}$ (co pozwala uznać, że obciążenia mają charakter pośredni pomiędzy quasi-statycznymi a dynamicznymi);
- skok szczęki ruchomej $s = 8 \text{ mm}$.



Rys. 3. Pomiar wielkości szczeliny wylotowej e , dla różnych zestawów szczęk

3. Wyniki doświadczeń

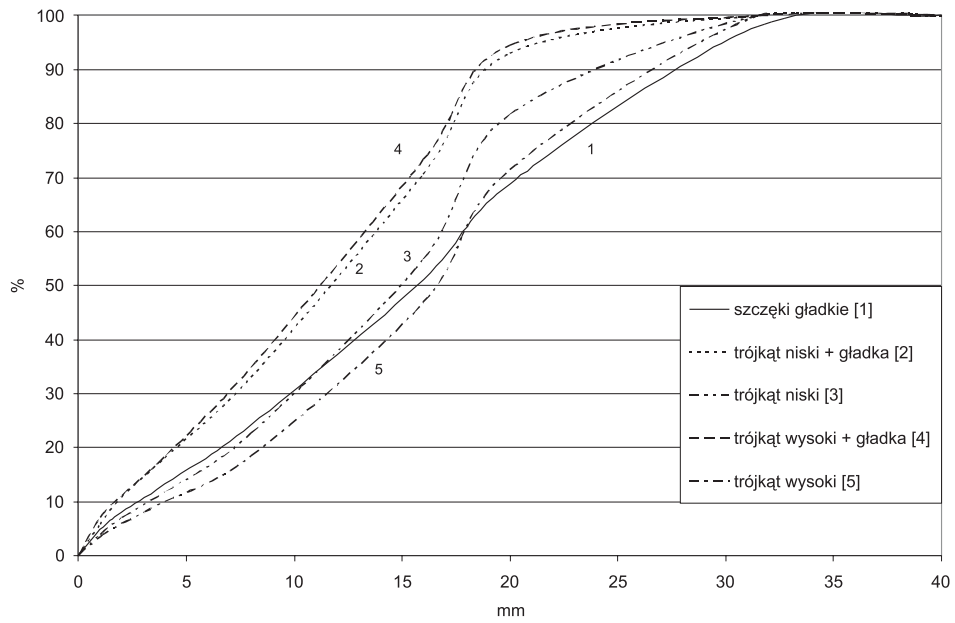
W tabeli 2 przedstawiono wyniki oznaczeń składu ziarnowego produktów otrzymanych z prób kruszenia. W tabeli 3 i na rysunku 6 podano zawartość ziaren nieforemnych w produktach rozdrabniania, oznaczoną za pomocą sit szczelinowych. Wyniki pomiarów wydajności laboratoryjnej kruszarki szczękowej przedstawiono w tabeli 4, a wyniki pomiarów sił kruszenia w tabeli 5.

TABELA 2

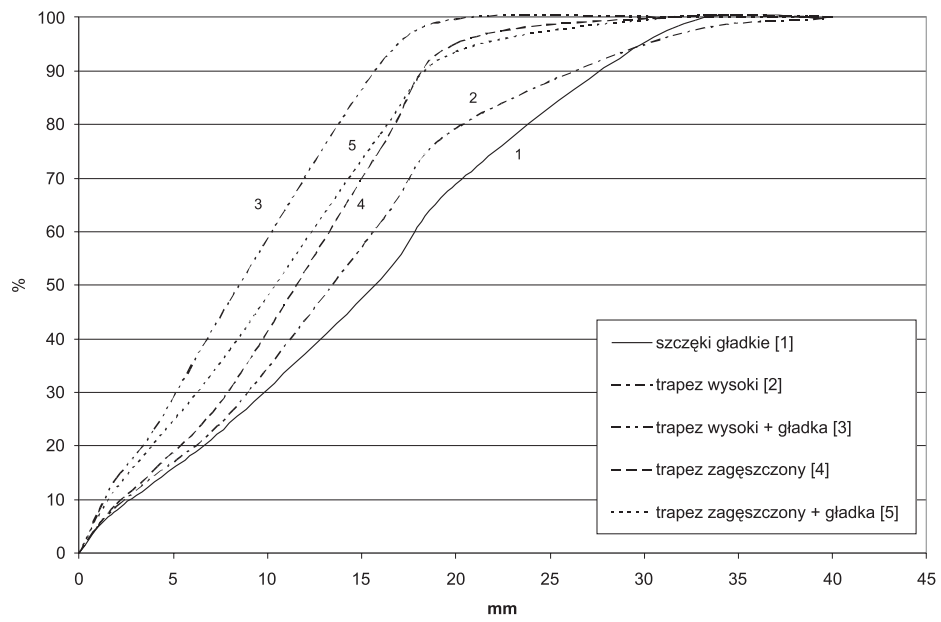
Skład ziarnowy produktów z kruszarki szczękowej, przy zastosowaniu różnych szczęk kruszących (materiał kruszony — wapień; szczelina wylotowa $e = 20$ mm)

Rodzaj wykładzin szczęk	Pozostałość na sitach, %							
	31,5 mm	20 mm	16mm	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm	0
szczęki gładkie	2,0	29,1	17,8	26,9	11,0	5,1	3,3	4,8
trójkąt niski + gładka	0	7,0	22,3	37,7	14,9	7,3	5,0	5,8
trójkąt niski		18,3	26,8	32,3	10,8	4,8	3,1	3,9
trójkąt wysoki + gładka	0	5,5	21,2	38,5	16,5	7,2	4,1	7,0
trójkąt wysoki	0	28,6	24,5	28,5	8,4	4,1	2,4	3,5
trapez wysoki + gładka	0	0,3	8,4	44,2	24	9	6,5	7,6
trapez wysoki	3,4	17,4	17,6	35,6	11,5	5,8	3,6	5,1
trapez zagęszczony	0	4,9	19,7	44,9	15,0	6,3	4,1	5,1
trapez zagęszczony + gładka	0	6,4	15,4	40,4	17,3	8,3	5,3	6,9
trapez zagęszczony + gładka $e = 26$ mm	1,5	32,2	18,2	25,9	10,9	4,5	2,6	4,2

Wyniki dotyczące składu ziarnowego produktów otrzymanych przy kruszeniu szczękami o różnym profilu poprzecznym przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Skład ziarnowy produktów kruszenia dla różnych wykładzin szczęk (szczęki kombinowane trójkątne). Materiał kruszony: wapień. Szczelina wylotowa $e = 20$ mm

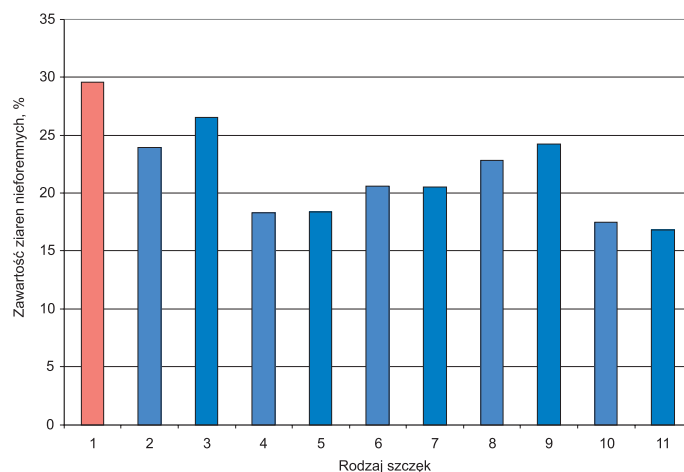


Rys. 5. Skład ziarnowy produktów kruszenia dla różnych wykładzin szczęk (szczęki kombinowane trapezowe). Materiał kruszony: wapień. Szczelina wylotowa $e = 20$ mm

TABELA 3

Zawartość ziaren nieforemnych w produktach kruszenia wapienia w kruszarce szczękowej, dla różnych profili szczęk (szczelina $e = 20$ mm, z wyjątkiem poz. 10 i 13)

Rodzaj szczęk	Zawartość ziaren nieforemnych (wskaźnik płaskości) %, dla klas ziarnowych					Średnia ważona dla klasy 6,3÷20
	6,3÷8 mm	8÷10 mm	10÷12,5 mm	12,5÷16 mm	16÷20 mm	
gładkie	52,5	41,4	37,0	28,6	20,9	29,6
trójkąt niski	39,4	34,7	25,9	22,5	17,4	23,9
trójkąt niski + gładka	42,9	37,4	30,6	25,1	16,0	26,5
trójkąt wysoki	40,4	29,1	23,9	15,1	10,1	18,3
trójkąt wysoki + gładka	31,5	26,3	18,3	19,5	9,4	18,4
trapez niski	39,9	28,0	22,4	13,9	11,0	20,6
trapez niski + gładka	32,6	27,9	22,9	19,7	15,5	20,5
trapez wysoki	37,4	34,7	22,6	19,6	14,3	22,8
trapez wysoki + gładka	32,1	26,9	22,9	21,5	19,3	24,2
trapez zagęszczony, $e = 15$ mm	27,4	18,6	11,9	10,3	9,4	14,5
trapez zagęszczony	32,9	31,4	18,5	13,7	10,7	17,5
trapez zagęszczony + gładka	28,2	20,7	14,6	14,6	11,7	16,8
trapez zagęszczony + gładka, $e = 26$ mm	39,6	30,5	30,3	26,9	17,1	26,3

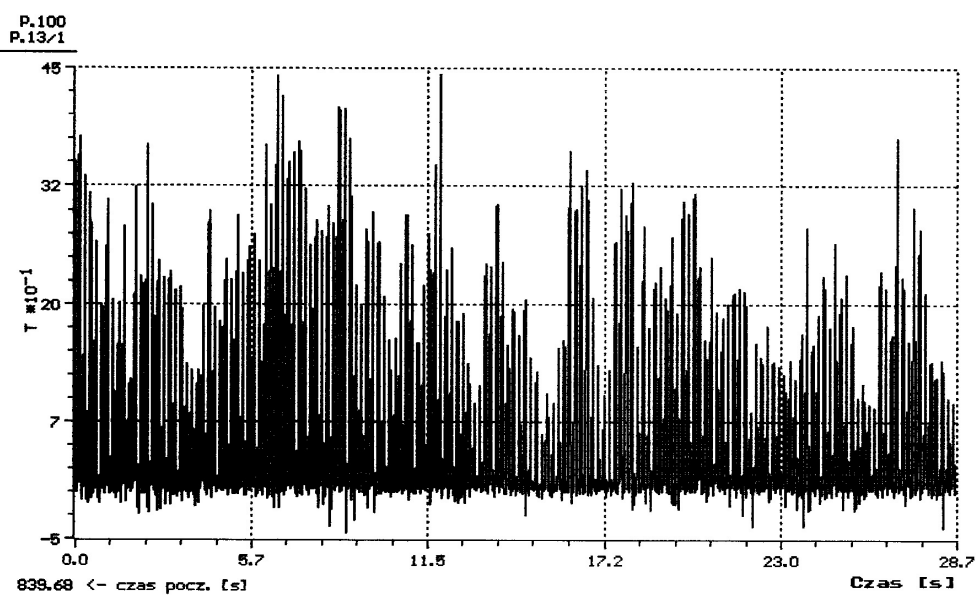


Rys. 6. Zawartość ziaren nieforemnych w produktach kruszenia wapienia, dla różnych wykładzin szczęk kombinowanych (na podstawie wyników z tab. 3). Rodzaje szczęk: 1 — gładkie; 2 — trójkąt niski; 3 — trójkąt niski + gładka; 4 — trójkąt wysoki; 5 — trójkąt wysoki + gładka; 6 — trapez niski; 7 — trapez niski + gładka; 8 — trapez wysoki; 9 — trapez wysoki + gładka; 10 — trapez zagęszczony; 11 — trapez zag. + gładka

TABELA 4

**Wyniki pomiarów wydajności laboratoryjnej kruszarki szczękowej.
Materiał rozdrabniany — wapień**

Rodzaj szczęk	Szczelina wylotowa e, mm	Średnia wielkość pola przekroju wylotu z kruszarki, mm ²	Średnia wydajność, kg/godz.	Zawartość ziaren nieforemnych (wskaźnik płaskości), %		d ₅₀ produktów, mm
				klasa 6,3÷16 mm	klasa 6,3÷20 mm	
gładkie	20	576	1393	37,1	29,6	15,7
trójkąt niski	20	576	520	28,4	23,9	14,9
trójkąt niski + gładka	20	432	707	31,8	26,5	11,6
trójkąt wysoki	20	576	403	24,1	18,3	16,6
trójkąt wysoki + gładka	20	372	613	22,5	18,4	11,2
trapez niski	20	576	450	21,5	20,6	13,7
trapez niski + gładka	20	432		22,0	20,5	
trapez wysoki	20	576	170	25,6	22,8	13,5
trapez wysoki + gładka	20	372		25,0	24,2	8,5
trapez zagęszczony	15	456	187	20,0	14,5	9,0
trapez zagęszczony	20	576	321	21,3	17,5	11,5
trapez zagęszcz. + gładka	20	417	482	18,1	16,8	10,4
trapez zagęszcz. + gładka	26	561	947	30,6	26,3	16,4



Rys. 7. Zapis pomiaru sił kruszenia (materiał kruszony — diabaz; szczęki trapezowe)

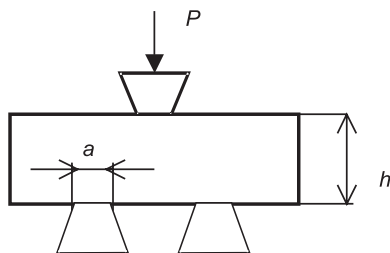
Pomiaru sił kruszenia dokonano podczas równomiernej pracy kruszarki, przy użyciu tensometru umieszczonego na płycie rozporowej kruszarki i komputera z programem rejestrującym przebieg sił kruszenia w czasie (rys. 7).

TABELA 5

Wyniki pomiarów sił kruszenia w kruszarce szczękowej z wykładzinami szczęk o różnym kształcie rowkowania

Rodzaj rowkowania szczęk	Materiał kruszony	Średnia siła kruszenia		Maksymalna siła kruszenia	
		wielkość siły, kN	wartość średnia dla poszczególnych szczęk, kN	wielkość siły, kN	wartość średnia dla poszczególnych szczęk, kN
trapezowe	wapień	6,5	6,1	57,0	60,0
trapezowe	wapień	6,2		71,5	
trapezowe	porfir	8,2		78,4	
trapezowe	porfir	4,7		52,0	
trapezowe	porfir	6,7		57,0	
trapezowe	diabaz	5,6		44,6	
trójkątne	wapień	4,4	8,6	54,3	77,7
trójkątne	wapień	7,3		77,4	
trójkątne	porfir	11,4		107,0	
trójkątne	diabaz	8,5		72,2	
faliste	wapień	6,1	8,2	60,4	65,9
faliste	wapień	5,5		51,5	
faliste	porfir	9,4		73,1	
faliste	diabaz	9,3		78,6	
falista + gładka	wapień	8,7	8,4	90,6	89,5
falista + gładka	porfir	9,6		114,1	
falista + gładka	diabaz	6,9		63,8	
trójkątna+ gładka	wapień	8,3	10,9	79,2	111,5
trójkątna+ gładka	porfir	13,0		154,6	
trójkątna+ gładka	diabaz	11,4		100,8	
trapezowa + gładka	wapień	7,0	11,3	60,0	88,4
trapezowa + gładka	porfir	15,7		125,4	
trapezowa + gładka	diabaz	11,2		79,9	

Wyniki pomiarów sił kruszenia warto porównać z obliczeniami teoretycznymi. Dla rozpatrywanych przypadków możemy przyjąć sposób obciążania materiału rozdrabnianego, jak na rysunku 8. Jest to schemat odpowiadający obciążeniu bloku materiału płytami kruszącymi z korbami o przekroju trapezowym.



Rys. 8. Obciążenie bloku kamiennego przestawionymi stemplami o przekroju trapezowym

Opierając się na teorii stanów granicznych, nacisk graniczny p , czyli nacisk potrzebny do wywołania mechanizmu zniszczenia, można obliczyć z wzoru [6]

$$p = 2 \frac{\cos \rho}{1 - \sin \rho} \left[c + \left(\frac{h}{a} - \frac{1}{2 \operatorname{tg} \rho} \right) S_r \right]$$

gdzie:

- ρ — kąt tarcia wewnętrznego,
- c — spójność,
- h — wysokość bloku,
- a — szerokość stempli,
- S_r — wytrzymałość na rozciąganie.

Siłę graniczną P potrzebną do wywołania nacisku granicznego p można określić wzorem

$$P = p l a$$

gdzie l — długość bloku (długość korbów trapezowych naciskających na blok skalny).

Dla porfiru możemy przyjąć:

$$\rho = 30^\circ;$$

$$c = 40 \text{ MPa};$$

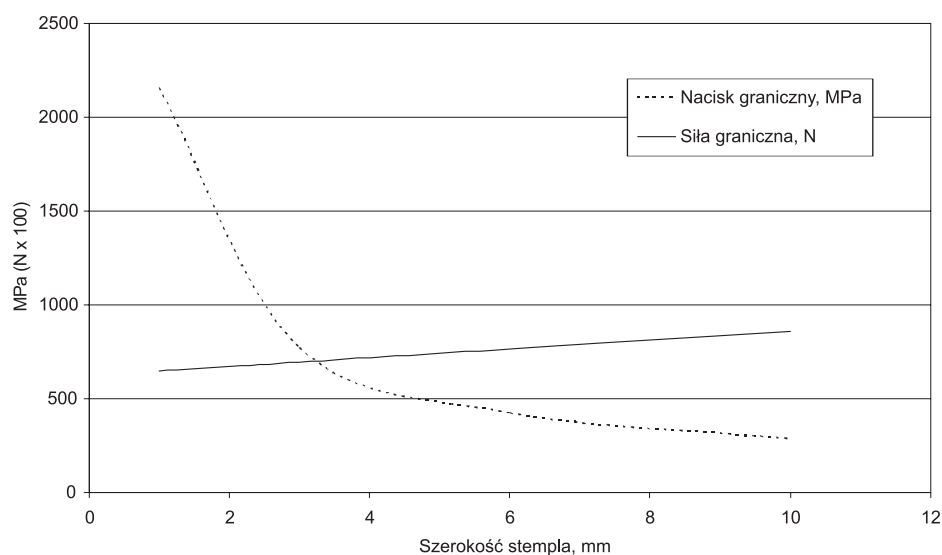
$$S_r = 20 \text{ MPa}.$$

Przyjmując wymiary liniowe $h = 30 \text{ mm}$; $l = 30 \text{ mm}$ oraz szerokość stempli a zależnie od rodzaju rowkowania powierzchni roboczej, możemy obliczyć wielkości nacisków i sił granicznych (tab. 6 i rys. 9).

TABELA 6

Wymiary stempli ściskających oraz wielkości nacisków i sił granicznych

Rodzaj stempli	Szerokość stempli a , mm	Nacisk graniczny p , MPa	Siła graniczna P , kN
o przekroju trójkąta	1	2157	64,7
o przekroju trapezu	3	771	69,4
o przekroju trapezu	6	425	76,5
gładkie	10	286	85,8

**Rys. 9.** Zmiana nacisków granicznych i sił granicznych w zależności od szerokości stempla

W próbach ściskania foremnych bloków materiałów skalnych za pomocą stempli w kształcie klina o płaskiej powierzchni nacisku ustalono, że minimalne siły rozdrabniania P występują wówczas, gdy naprężenia (p) pod stemplem osiągają maksymalną wartość [5]. Zależność powyższą ilustruje również wykres przedstawiony na rysunku 9, sporządzony w oparciu o wyniki przeprowadzonych obliczeń (tab. 6).

4. Omówienie wyników i podsumowanie

Z porównania składu ziarnowego produktów wynika, że dla zestawów — szczęka gładka + szczęka rowkowana uzyskano drobniejszy produkt (większy stopień rozdrobnienia), niż dla obu szczęk rowkowanych. Spowodowane to jest oczywiście mniejszym polem prze-

roku szczeliny wylotowej. Średnie ziarno d_{50} produktów dla procesu kruszenia za pomocą płyt kombinowanych (gładka + rowkowana) było niższe o około 20÷30%, w porównaniu z obydwoma płytami rowkowanymi.

Pomimo, że dla szczęk kombinowanych szczelina wylotowa posiadała mniejszą powierzchnię przekroju, uzyskano dla nich większe wydajności kruszenia. Dla szczęk kombinowanych wydajność kruszenia była o 35÷50% wyższa niż dla obu szczęk rowkowanych. Tłumaczyć to można tym, że przy obydwu płytach rowkowanych grawitacyjny przepływ materiału przez komorę kruszenia jest bardziej utrudniony (większe opory przepływu), niż w przypadku zestawu płyt: gładka + rowkowana.

Zawartości ziaren nieforemnych dla obu płyt rowkowanych jak i dla płyt kombinowanych (płyta gładka + rowkowana), były zbliżone. Na uwagę zasługuje mniejsza zawartość ziaren nieforemnych w produktach uzyskanych podczas kruszenia szczękami z rowkami o profilu trapezowym, jak również przy szczękach z rowkami trójkątnymi o wyższych zębach, dla których $h/t = 0,7$.

Dla obu szczęk rowkowanych najmniejsze siły kruszenia (średnie i maksymalne) wystąpiły w przypadku wykładzin z rowkami trapezowymi. Natomiast największe przy szczękach z rowkami trójkątnymi (samych szczęk gładkich nie badano). Wyniki te nie pokrywają się z wynikami obliczeń teoretycznych, dla których najmniejsze siły graniczne wystąpiły przy stemplach o przekroju trójkąta. Można stąd wnioskować, że w warunkach skrzepowanego obciążenia o wielkościach sił decydują inne elementy niż ujęte w przytoczonych wzorach. Rozpatrywany przykład wskazuje, jak trudno przenieść wyniki badań elementarnych prowadzonych w warunkach swobodnego obciążenia, na warunki laboratoryjne czy przemysłowe (obciążenia skrzepowane).

Wielkość sił kruszenia ma związek ze zużyciem energii i decyduje o obciążeniu elementów kruszarki. W przypadku mniejszych sił mamy do czynienia z mniejszym obciążeniem szczęk, płyty rozporowej, łożysk. Równocześnie widać, że kruszeniu najłatwiej ulegał wapień, co pokrywa się z jego względnie najniższymi właściwościami wytrzymałościowymi.

Dla zestawu: szczęka stała o powierzchni gładkiej + szczęka ruchoma o powierzchni rowkowanej, uzyskano większe średnie siły kruszenia (średnie i maksymalne). Odpowiada to trudniejszym warunkom kruszenia ziaren, w których w mniejszym stopniu zachodzi niszczenie ziaren przez zginanie i ścinanie.

Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że dla kruszarek szczękowych może być korzystne zastosowanie płyty rowkowanej współpracującej z płytą gładką. Przy zbliżonym stopniu rozdrobnienia i zawartości ziaren nieforemnych w produkcie, uzyskać można wzrost wydajności kruszarki. Ponieważ płyta gładka zużywa się wolniej niż płyta rowkowana, można się spodziewać zmniejszenia częstotliwości wymiany płyt kruszących na nowe i obniżenia kosztów eksploatacji kruszarki.

LITERATURA

- [1] *Kobiałka R., Naziemiec Z.*: Znaczenie kształtu powierzchni płyt kruszących kruszarek szczękowych. IV Międzynarodowa Konferencja Techniki Urabiania, Kraków–Krynica, 2005
- [2] *Tumidajski T., Naziemiec Z.*: Wpływ warunków procesu kruszenia na kształt ziaren kruszyw mineralnych. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, 2004

- [3] *Gawenda T., Naziemiec Z.*: Sposoby poprawy kształtu ziaren kruszyw mineralnych w kruszarkach szczękowych. *Inżynieria Mineralna*, 2003, zeszyt nr S.3 (10)
- [4] *Wermter K.*: Verschleißminderung beim Brechen von Kies. *Aufbereitungs-Technik*, 1988, Nr 3
- [5] *Zawada J., Pawlak W.R.*: Einfluß der Oberflächenform von Brechplatten für Backenbrecher auf das Zerkleinerungsergebnis. *Aufbereitungs-Technik*, 1988, Nr 3
- [6] *Zawada J.*: Wstęp do mechaniki procesów kruszenia. Radom, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji 1998